

dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, Prof. PK
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej (M10)
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Artura Króla pt.:
„Engineering knowledge management with the use of the „Digital
Twins” method”**

Podstawa opracowania:

*Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia
25.10.2023 zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej
Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 26.10.2023 znak: RDJMe.512.31.2023*

1. Charakterystyka ogólna

Cyfrowy bliźniak to nic innego jak wirtualna kopia rzeczywistego obiektu, procesu lub systemu, której celem jest dokładne odwzorowanie jego właściwości i zachowań. Przy pomocy tej technologii możemy symulować różne scenariusze działania, przewidywać ewentualne problemy oraz optymalizować procesy produkcyjne bez ryzyka wprowadzenia zmian w rzeczywistym świecie. Koncepcja cyfrowego bliźniaka w kontekście produkcyjnym nie jest nowa. Już w 2002 roku pojęcie to opisał profesor University of Michigan Michael Grieves. Zaproponował, by cyfrowy bliźniak był logicznym uzupełnieniem rozwiązań PLM (*Product Lifecycle Management*). Ponieważ funkcja cyfrowego bliźniaka dotyczy dwóch zasadniczych etapów tego cyklu – etapu projektu i etapu wdrożenia – mamy dwa typy cyfrowych bliźniaków. Typ pierwszy pełni funkcję prototypu, a więc jest tworzony zanim powstanie jakieś rozwiązanie, produkt, fabryka czy łańcuch logistyczny. Taki cyfrowy bliźniak zostaje opracowany, by testować rozmaite warianty jakiegoś obiektu czy procesu przed wdrożeniem, co pozwala oszczędzać zasoby i redukować koszty związane z testami. Typ drugi to bliźniak istniejącego już rozwiązania, pozwalający lepiej zarządzać prawdziwą fabryką, produktem czy łańcuchem dostaw. Tu dochodzi możliwość silnego zintegrowania cyfrowego bliźniaka z rzeczywistym rozwiązaniem i lepsze zarządzanie istniejącym systemem.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 11.01.2024
RDJMe/715/2024
nr zał.

Współczesne procesy rozwoju i wytwarzania produktów, niezależnie od podejścia przedsiębiorstwa, są bardzo złożone. Przechowywanie wiedzy inżynierskiej i efektywne zarządzanie wiedzą to procesy strategiczne w przedsiębiorstwie. Dotyczy to także prawidłowego gromadzenia danych, przetwarzania informacji, a także zarządzania wiedzą, dlatego wirtualna symulacja poszczególnych maszyn, linii produkcyjnych czy całego modelu zarządzania biznesu pozwala z wyprzedzeniem wykrywać nieprawidłowości, lepiej gospodarować zasobami, czy testować bez ryzyka. Wprowadzenie cyfrowych bliźniaków odbywa się przy odpowiednim zdefiniowaniu projektu i efektywnym wykorzystaniu narzędzi już istniejących do mapowania procesów biznesowych. Jest połączeniem wielu elementów dotyczących projektowania technologii informatycznej z produkcyjną na inżynierii mechanicznej kończąc. **Z tego powodu praca doktorska M. Sc. Eng. Artur Król poświęcona metodzie zarządzania wiedzą inżynierską z wykorzystaniem „Digital Twins” wpisuje się w dyscyplinę - inżynierii mechanicznej.**

Recenzowana praca liczy 114 stron i składa się z 6 rozdziałów, w tym spisu treści, spisu pojęć, rysunków i tabel używanych w pracy, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografii, w której zamieszczono 61 pozycji, które niestety nie zostały ponumerowane.

Rozdział 2 The theory of digital twins and industrial revolutions – przedstawia etapy rewolucji przemysłowych wraz z określeniem ich ram czasowych oraz podstawowych osiągnięć. Nakreśla elementy czwartej rewolucji przemysłowej, której jednym z aspektów jest wykorzystanie cyfrowego bliźniaka. Określa również

kluczowe technologie dla wdrożeń cyfrowych bliźniaków, takie jak: Big data, Cyber-Physical-Systems (CPS), IoT – The Internet of Things, Cyber Security, Blockchain. W rozdziale omówiono też ewolucję metod symulacji jak i różne definicje cyfrowego bliźniaka wraz z jego dotychczasowymi implementacjami.

Rozdział 3 Description of the research problems in context of the automotive market– zawiera szeroką analizę zmian wpływających na projektowanie i rozwój systemów oraz komponentów, wykorzystywanych do budowy pojazdów, których kluczowym trendem jest elektryfikacja. Znacząco wzrosła masa współczesnych pojazdów: elektrycznych, hybrydowych i hybrydowych typu plug-in. W ostatniej dekadzie bardzo popularne stały się też pojazdy typu SUV, wybierane zamiast pojazdów lekkich lub średnich. Wszystko to powoduje znaczne zwiększenie wymagań dotyczących obciążenia elementów zawieszenia.

Do tak przedstawionego zagadnienia doktorant sformułował główne problemy badawcze swojej pracy, podyktowane wymaganiami firmy:

-Czas rozwoju. Zespoły projektowe mają zazwyczaj 2-4 tygodnie na analizę wymagań i zaproponowanie rozwiązań projektowych. *Organizacja spodziewa się wykorzystać wiarygodne techniki symulacyjne, aby przyspieszyć czas rozwoju poprzez wyeliminowanie konieczności wytwarzania prototypów i wykonywania planu testów.*

-Symulacja. Wyniki symulacji nie zawsze są skorelowane z wynikami testów. W konsekwencji zaproponowane rozwiązanie projektowe może nie spełnić wymagań klienta. Aby uniknąć takich problemów, zespoły projektowe decydują się na produkcję prototypów i przeprowadzenie testów weryfikacyjnych. *Oczekuje się uzyskania technik symulacyjnych, które przewidują wyniki zgodne z wynikami testów i minimalizują koszty prototypów i testów.*

-Systemy cyfrowe. Obecnie dostępne systemy nie są ze sobą powiązane, a dostępne dane nie są digitalizowane. Kolejnym problemem dostępnych obecnie systemów są ograniczone możliwości wyszukiwania historycznych wyników badań. *Organizacja oczekuje uzyskania systemów cyfrowych i połączonych z zadowalającymi możliwościami wyszukiwania danych.*

W podrozdziale 3.3. Thesis and the resarch goal- autor sformułował tezę: "Koncepcja cyfrowego bliźniaka może zostać wdrożona w procesie projektowania i

rozwoju produktu, co skutkuje usprawnieniami w obszarach zarządzania wiedzą inżynierską, skracając czas rozwoju i testowania." Niestety nie przedstawił celu, jak można byłoby się spodziewać po tytule podrozdziału.

Rozdział 4 Analysis of the design process and engineering knowledge management– W rozdziale tym przedstawiona została analiza procesu projektowania z uwzględnieniem szeroko pojętego etapu zarządzania wiedzą inżynierską. Doktorant przedstawił poszczególne elementy powstawania nowego projektu, co miało na celu identyfikację wąskich gardeł procesowych, zagrożeń czy ryzyk technicznych projektu. Zostały one przeanalizowane w celu zredukowania godzin inżynierskich. Wyniki analizy porównano z wdrożeniem cyfrowego bliźniaka.

Rozdział 5 Digital twin implementation – rozdział zawiera koncepcję implementacji cyfrowego bliźniaka do procesu rozwoju projektu. Koncepcja ta została przedstawiona w kilku etapach dla standaryzacji kształtów geometrycznych wspornika stabilizatora. Wszystkie parametry zostały zdigitalizowane i zapisane w systemie SAP, co umożliwiło automatyczne przeniesienie z systemu SAP na platformę testową lub zarządzającą MES, wspierającą tworzenie cyfrowych raportów. Kluczowym krokiem było opracowanie platformy analizy danych, dzięki której wyniki symulacji można było porównać z wynikami fizycznymi. W przypadku różnicy autor przeprowadzał procedurę dostosowania symulacji w oparciu o algorytm optymalizacyjny, tak aby zminimalizować różnicę pomiędzy wynikami symulacji i badań. Procedura ta wymagała dokładnego odtworzenia warunków testowych poprzez symulację, opracowanie pewnego rodzaju modelu fizycznego, numerycznego, który miał wiernie odzwierciedlać proces. Tak dostosowana symulacja została przez doktoranta nazwana cyfrowym bliźniakiem, co pozwoliło na wykorzystanie jej do przewidywania wydajności fizycznej symulowanego komponentu. Algorytm pozwalający na ciągłą regulację wykorzystuje wyniki badań walidacyjnych przeprowadzonych na prototypach wytwarzanych na standardowej linii produkcyjnej. Koncepcja zakłada ciągłą modyfikację parametrów symulacji, tak aby prognoza symulacji była zgodna z założonymi wynikami badań.

Drugim projektem pilotażowym, mającym na celu weryfikację wdrożenia cyfrowego bliźniaka, był test zginania pręta, który jest kluczowym elementem amortyzatora. Jednak dokładność symulacji nie została zaakceptowana przez firmę.

Rozdział 6 Conclusions and further research topics- stanowi podsumowanie rozprawy, w której stwierdzono, że głównym celem pracy doktorskiej było doskonalenie zarządzania wiedzą w procesie projektowania i rozwoju produktów w firmie Tenneco. Doktorant zauważa też, iż skupiając się wyłącznie na narzędziach informatycznych, wspomagających zarządzanie wiedzą, nie da się osiągnąć wymaganej poprawy, jednak wdrożenie cyfrowego bliźniaka nie tylko usprawnia zarządzanie wiedzą, ale także znacząco obniża koszty całego procesu. W rozdziale tym autor wyznacza też kierunki dalszych prac.

Układ pracy, język oraz sposób prezentacji treści merytorycznych w niej zawartych jest zrozumiały. Ponadto stronę graficzną i edytorską należy ocenić dobrze. Autor jednak nadużywa pewnych skrótów myślowych i zbyt dużych przeskoków tematycznych bez wyjaśnień, ponadto wykorzystuje programy, czy algorytmy w programach dość bezkrytycznie, co jednak nie umniejsza jego dużej wiedzy praktycznej.

Uwagi edytorskie:

- wykaz skrótów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym jest ułożony niealfabetycznie;
- część rysunków jest nieczytelna np. 28, 54, 55;
- nie wstawia się kropki po tytułach rozdziałów czy podrozdziałów (podrozdział 1.3 str 8);
- błąd edytorski str 17 (The key activities are presented in the **Error! Reference source not found.**Table 1.);
- rysunek 12 posiada odnośniki jako numery, które nie są opisane;
- literatura nie posiada numeracji, a odwołania w tekście są za pomocą nazwiska pierwszego autora i roku co jest bardzo mylące.

3. Ocena przyjętej przez Autora koncepcji naukowej oraz sposobu jej realizacji

Zainteresowanie tematem „Cyfrowego bliźniaka” w przemyśle rośnie z roku na rok, a wraz z wprowadzeniem terminu i założeń Przemysłu 4.0 nastąpił jego

znaczący rozwój. Firmy zauważyły potencjał wykorzystania różnych symulacji niemalże przy każdym etapie produkcji, od projektowania założeń, poprzez ich optymalizację, aż do predykcji awarii. Dane gromadzone podczas pracy z narzędziami wykorzystanymi do budowy cyfrowego bliźniaka pomagają w podejmowaniu decyzji wpływających na całą produkcję, pomagają w usystematyzowaniu i przechowywaniu potrzebnych danych, a także w zarządzaniu łańcuchem dostaw. Nowe perspektywy wyłaniają się z podejścia polegającego na integracji poszczególnych modeli i narzędzi programowych w spójny, semantycznie powiązany system.

Praca Pana mgr inż. Artura Króla skupia się na wdrożeniu cyfrowego bliźniaka do procesu rozwoju projektu w rzeczywistym środowisku i w sposób empiryczny udowadnia jego skuteczność.

Analizując jednak opracowane przez autora zagadnienia i ich możliwe wykorzystanie praktyczne, narzuciły się recenzentce pewne kwestie polemiczne, które wymagają wyjaśnienia:

-Pokazanie wyników testów nie jest wystarczające. Czy spotkał się Pan z walidacją metody, np. za pomocą testu modelu statystycznej spójności czy modelu normalnej spójności i miar rozbieżności "Birge'a" lub najprostszego wskaźnika En opisanego w normie PN-EN ISO/IEC 17043:2011?

-Table 11. Comparison of statistical analysis- wypisane parametry są bez jednostek i z różną ilością miejsc znaczących. Wynik pomiaru kształtu podany jest raz do 3 miejsc, a drugi raz do 5 miejsc po przecinku, co sugeruje narzędzia pomiarowe o różnej dokładności. Czy projektując symulacje uwzględnił Pan zasady doboru narzędzi pomiarowych?

- Doktorant zastosował **Test t Studenta dla jednej próby**, wykorzystał Hipotezy zerową i alternatywną, które są testami parametrycznymi, a co za tym idzie, mierzone zmienne ilościowe powinny mieć rozkład normalny. Czy doktorant sprawdził to?

-Dlaczego Doktorant nie sformułował jasno celu w pracy? W rozdziale pod tytułem „Thesis and the resarch goal” jest postawiona tylko teza. Cel jest wspomniany we wnioskach, ale tylko w kontekście: „The main goal of the doctoral thesis was to improve the knowledge management in the product design and development process in the Tenneco company. However, it must be stressed that focusing solely on IT tools supporting the knowledge management one is not able to achieve the required improvement.” Proszę o jasne sformułowanie celu lub celów pracy.

-Jakie widzi Pan możliwości zastosowania w swojej pracy, powszechnie uznanej Metody symulacji Monte Carlo?

Mimo wyrażonych przez recenzentkę wątpliwości wymagających wyjaśnienia, praca doktorska Pana mgr inż. Artura Króla zasługuje na pozytywną ocenę, ponieważ:

- doktorant sformułował problem badawczy polegający na opracowaniu koncepcji cyfrowego bliźniaka, którego wdrożenie w proces projektowania i rozwoju produktu, skutkuje usprawnieniami w obszarach zarządzania wiedzą inżynierską, skracając czas rozwoju i testowania;
- opracował koncepcję algorytmów pozwalających na usprawnienie całości procesów biznesowych poprzez analizę statystyczną danych;
- opracował koncepcję wdrożenia analizy statystycznej obejmującej analizę Weibulla wykorzystywaną dla pojedynczych przypadków obciążeń oraz analizę Wöhlera wykorzystywaną dla mnożenia przypadków obciążeń;
- ograniczył ryzyko błędnej definicji projektu na etapie zapytania ofertowego;
- opracował koncepcję wspierania etapu weryfikacji projektu poprzez wykorzystanie „Digital Twin” eliminując część testów fizycznych;
- opracował koncepcje skorelowania powstałego „Digital Twin” dla konkretnych rozwiązań, z wynikami testów fizycznych;
- zaimplementował opisane algorytmy w realnych aplikacjach i przeprowadził testy poprawności ich działania, co jest wpisane w założenia doktoratów wdrożeniowych.

Powyższe dokonania dowodzą, że doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych, oraz że rozwiązał postawiony w pracy doktorskiej problem i sformułował kierunki dalszych badań nad rozwojem zaproponowanych rozwiązań:

- dalszego gromadzenia wyników testów z nowych projektów;
- optymalizacja symulacji w celu zwiększenia jej dokładności;
- zoptymalizowanie symulacji w oparciu o nowe dane, aby zminimalizować przedział ufności estymacji dostarczonej przez cyfrowego bliźniaka;
- wdrożenie rozwiązań od projektów pilotażowych do kolejnych procedur testowych.

Zadania te powinny być zatem przedmiotem dalszych prac nad doskonaleniem proponowanych metod przez autora.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- autor dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane doktoratom wdrożeniowym wymagania;
- zasadnicza teza pracy została osiągnięta, w zakresie przyjętym przez Doktoranta, a prezentowane wyniki są uzyskane w zazwyczaj poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach i mogą służyć do dalszych prac;
- formalny układ pracy jest prawidłowy;
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki;
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Króla pt.: „Engineering knowledge management with the use of the „Digital Twins” method” stwierdzam, zatem, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz.85 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Kraków 23.12.2023

Prof. Ksenia Ostrowska|

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)